

유한 요소법을 이용한 컨버터용 압전 변압기의 온도 특성 해석

주현우, 정현교
서울대학교 전기공학부

Analysis of Thermal Characteristics of Piezoelectric Transformer for Converter by Finite Element Method

Hyun-Woo Joo, Hyun-Kyo Jung
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract

최근 전자 부품으로써 널리 사용되는 압전 변압기는 고전계 구동시 야기되는 압전체의 기계적인 진동 손실 및 유전 손실에 의해 높은 온도 상승이 초래된다. 이는 압전 변압기의 동작 특성 변화를 일으키며 결국 압전 변압기의 공진 주파수의 변화 및 효율의 감소 등 비선형성의 원인이 된다. 본 논문에서는 유한 요소법을 이용한 압전 변압기의 공진 특성을 해석하였으며 이를 이용하여 압전 변압기의 기계적인 진동 손실 및 유전 손실을 계산하였다. 또한 유한 요소법을 이용한 3차원 열전달 방정식의 해석을 이용하여 압전 변압기의 온도 분포를 해석하였으며 이를 실험적으로 검증하였다.

Key Words : 압전 변압기, 유한 요소법, 유전 손실, 진동 손실

1. 서론

소형화, 경량화 및 높은 주파수 대역에서의 동작 등의 장점을 가지는 압전 변압기는 고주파 영역에서의 동작이 요구되는 전원 공급 장치 및 notebook panel 등과 같은 분야에의 적용을 위해 연구되고 있다. 1957년 Rosen에 의해 압전 변압기가 제안된 이래 이를 효과적으로 해석 및 설계하기 위해 전기 등가 회로를 이용한 방법이 주를 이루었으나 최근에 압전 변압기의 전극 형상 및 구조가 복잡해짐에 따라 유한 요소법의 의해 수치 해석적인 방법의 의해 압전 변압기의 해석 및 설계가 연구되고 있다.

압전 변압기는 고전계 구동 시 압전 물질 내의 기계적인 진동 손실 및 유전 손실에 의해 야기되는 온도 증가에 의해 기계 품질 계수의 저하, 효율의 저하, 공진 주파수의 변화 및 gain의 변화 등 비선형성의 원인이 된다[1]. 현재 압전 변압기의 손실 및 온도상승을 줄이기 위한 연구는 주로 높은 기계 품질 계수를 가지도록 압전 변압기를 설

계하거나 또는 방열판을 이용하여 압전 변압기 내부 온도 상승을 억제하는 방향으로 진행되고 있다.

본 논문에서는 실험적으로 검증된 유한 요소법을 이용하여 압전 변압기의 고전계 구동 시 야기되는 기계적인 진동 손실 및 유전 손실을 계산하였다. 또한 3차원 열전달 방정식을 유한 요소법에 적용하여 압전 변압기의 손실에 의해 야기되는 온도 분포를 해석하였다.

2. 유한 요소법의 정식화 및 실험적 검증

행렬식 (1)은 압전체에서 기계적인 물리량과 전기적인 물리량의 상관관계를 표현하는 식으로 압전체의 유한 요소 정식화의 기본이 되는 식이다 [2].

$$\begin{aligned} T &= c^E S - e' E \\ D &= e S + \epsilon' E \end{aligned} \quad (1)$$

해밀턴의 변분법을 압전체에 적용하면 아래와 같은 유한 요소법을 이용하여 압전체를 해석하기 위한 선형 차분 방정식을 얻을 수 있다[2].

$$\begin{aligned}
 -\omega^2 M u + j\omega D_{uu} u + K_{uu} u + K_{u\phi} \phi \\
 = F_B + F_S + F_P \\
 K_{u\phi}^T u + K_{\phi\phi} \phi = Q_S + Q_P
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

그림.1은 유한 요소법을 통해 구한 압전체의 전기적인 임피던스 파형과 실험에 의한 임피던스 파형의 비교를 나타낸다. 또한 임피던스 파형 해석을 통해 그림.2의 시험 모델에 대한 공진 주파수와 반공진 주파수를 구할 수 있다. 유한 요소법을 이용한 해석 결과와 참고 문헌 [2]에서 인용된 실험 결과와 유사한 경향을 나타내므로 그림.1의 임피던스 파형은 본 논문에서의 유한 요소법 과정의 타당함을 보여준다.

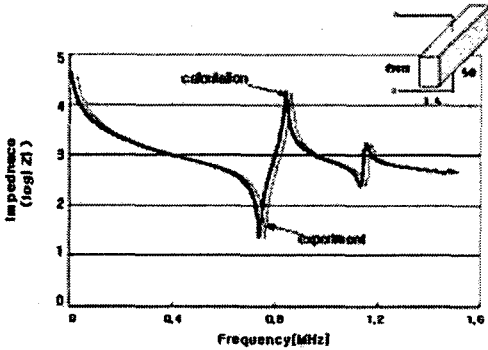


그림 1. 압전체의 임피던스 파형.

그림. 2는 실험적으로 검증된 3차원 유한 요소법을 이용한 컨버터용 압전 변압기의 입력 및 출력 임피던스를 나타낸다. 컨버터용 압전 변압기의 임피던스 해석을 통해 압전 변압기의 동작 주파수를 결정하였다.

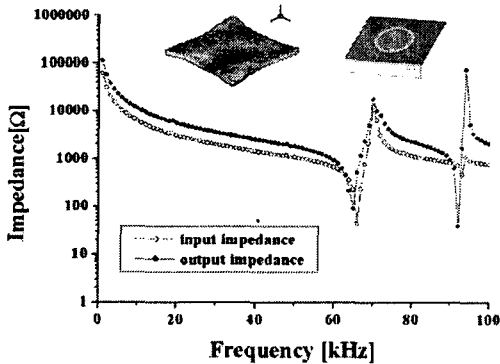


그림 2. 압전 변압기의 임피던스 파형.

3. 압전체의 손실 및 열전달

압전체의 손실은 크게 기계적인 진동 손실과 유전 손실로 구분되면 식 (3)과 (4)에 의해 계산된다 [3].

$$P_m = (1/2) * T * S * \omega r / Q_m \quad (3)$$

$$P_d = (1/2) * D * E * \omega r * \tan \delta \quad (4)$$

T : 응력 벡터 S : 변형 벡터
D : 유전 변위 벡터 E : 전계 벡터
Qm : 기계 손실 계수 ωr : 공진 주파수
tanδ : 유전 손실 계수

식 (3)과 (4)에서의 변형 벡터와 전계 벡터는 식 (2)의 해인 기계적인 변위와 전위의 변화량으로, 응력 벡터와 유전 변위 벡터는 식 (1)에 의해 계산된다. 그림.4 는 압전 변압기내의 진동 손실 분포를 그림 5.을 유전 손실 분포를 나타낸다.

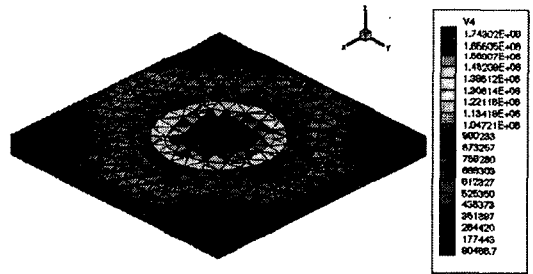


그림 3. 압전 변압기의 진동 손실 분포.

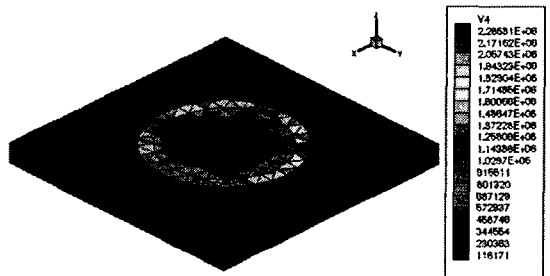


그림 4. 압전 변압기의 유전 손실 분포

기계적인 진동 손실 및 유전 손실을 가지는 압전 변압기에서의 열전달 방정식은 식 (5)와 같다[4].

$$\nabla^2 T = -Q^*/k \quad (5)$$

T : 온도 Q* : 단위 부피당 발생된 열량
k : 열전달 계수

또한 다음과 같이 대류에 의한 경계 조건을 가진다.

$$Q = h(T - T_a) \quad (6)$$

Q : 발생된 열량 h : 대류 계수
T_a : 공기 온도

식 (5)와 (6)에 Galerkin법을 적용하면 식 (7)-(13)과 같이 유한 요소 해석을 위한 식을 얻을 수 있다.

$$A \cdot T = F \quad (7)$$

$$A = A_k + A_s \quad (8)$$

$$F = F + F_s \quad (9)$$

$$A_k = \int_v k \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) dV \quad (10)$$

$$A_s = \int_s N_i (h N_j) dS \quad (11)$$

$$F = \int_v N_i Q^* dV \quad (12)$$

$$F_s = \int_s N_i h T_a dS \quad (13)$$

N_i : 3차원 형상 함수
S : 압전 변압기의 표면
A* : 온도 계수 행렬식
F* : 열량 행렬식

본 논문에서는 기계적인 진동 손실과 유전손실의 합을 압전 변압기 내에서 발생된 열량으로 정의했으며 대류 계수를 70[W/m²C], 열전달 계수를 1.2[W/mC]로 정의하였다[1].

그림. 5는 압전 변압기의 유한 요소 해석 및 3차원 열전달 방정식을 이용하여 구한 압전 변압기 내의

서의 온도 분포를 나타내며 그림. 6은 ThermoCAM P60을 이용하여 구한 압전 변압기의 온도 분포를 나타낸다.

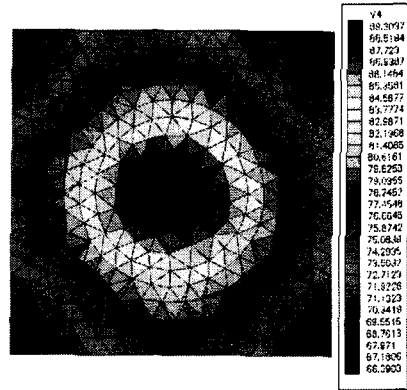


그림 5. 유한 요소법에 의한 압전 변압기의 온도 분포.

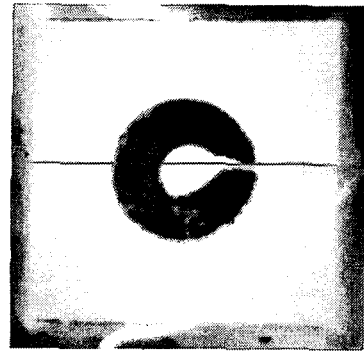


그림 6. 실험에 의한 압전 변압기의 온도 분포.

그림. 7은 길이 방향에 따른 압전 변압기의 온도 분포를 나타낸다. 그림. 7에 나타난 것과 같이 유한 요소법에 의한 압전 변압기의 온도 분포와 실험에 의한 온도 분포가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이 결과를 통해 본 논문에서의 유한 요소 해석을 통한 기계적인 진동 손실 및 유전 손실의 타당성과 유한 요소법을 이용한 3차원 열전달 방정식의 타당성을 검증하였다. 또한 그림. 7의 결과를 통해 압전 변압기의 온도 상승은 입력부에서 가장 크며 기계적인 진동 손실 분포와 유사함을 알 수 있다.

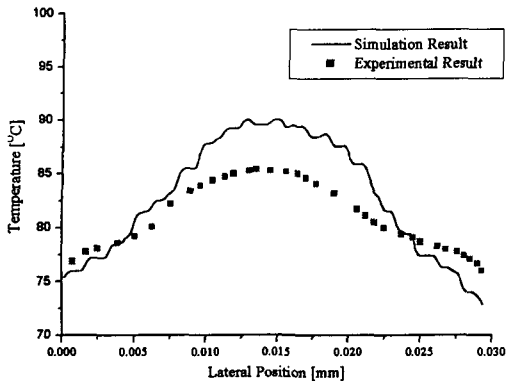


그림 7. 온도 분포의 해석 및 실험적 검증.

4. 결론

본 논문에서는 압전체의 3차원 유한 요소의 실험적 검증을 통해 유한 요소 해석의 타당성을 검증하였으며 이를 압전 변압기에 적용하여 압전 변압기의 동작 주파수를 결정하였다. 또한 기계적 진동 손실 및 유전 손실을 3차원 유한 요소법을 이용하여 계산하였으며 이를 열전달 방정식에 적용하여 고전계 구동 시 압전 변압기내에서의 온도 분포를 계산하였다. 온도 분포의 실험적 검증을 통해 유한 요소법에 의한 손실 계산 및 온도 분포 해석의 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] Junhui Hu, "Analysis of the Temperature Field in a Bar-Shaped Piezoelectric Transformer Operating in Longitudinal Vibration Mode", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 50, No. 6, pp594-600
- [2] Reinhard Lerch, "Simulation of Piezoelectric Devices by Two- and Three-Dimensional Finite Elements," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 37, pp. 233-247, May 1990
- [3] Kenji Uchino, "Loss Mechanisms in Piezoelectrics: How to Measure Different Losses Separately", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency